

## 유한요소해석법을 이용한 고정밀 반사경의 구조 해석

### Structural Analysis of High Precision Reflector Using Finite Element Analysis

이상용\*, 김기석\*, 김건희\*, 이영신\*\*†

Sang-Yong Lee\*, Ghiseok Kim\*, Geon-Hee Kim\* and Young-Shin Lee\*\*†

**초 록** 본 논문은 마운트의 형상 정밀도와 볼트의 체결력에 따라 마운트에 고정되는 반사경에 발생하는 응력과 변형량에 대해 연구하였다. 일반적인 반사광학계에 사용되는 고정밀 반사경은 볼트나 접착제로 마운트에 조립되는데 이러한 경우 볼트의 체결력과 접착제의 접착력으로 인해 발생하는 장력이 반사경면을 뒤틀리게 한다. 또한 반사경과 마운트를 조립한 후 반사경에 접촉되는 마운트의 표면 형상 정밀도에 따라 반사경면이 뒤틀려서 형상 정밀도가 변한다. 본 논문에서는 유한요소법을 이용한 구조 해석을 통해 반사경과 접촉되는 마운트의 형상 정밀도와 볼트의 체결력에 의해 고정밀 반사경의 반사경면에 발생하는 응력분포와 뒤틀림 변형량에 대해 연구하였다.

**주요용어:** 반사경, 마운트, 형상 정밀도, 볼트 체결력, 유한요소해석

**Abstract** In this paper, the effect of bolt clamping force and form accuracy of contact surface between mirror and mount on mirror surface was studied. Normally, mirror used in reflecting optical system was assembled with mount by bolts or adhesive. In this case, the tension caused by bolt clamping force or adhesive force may distort the mirror surface. Also, form accuracy error of the contact surface have a negative impact on wrenched mirror surface which assembled by bolts or adhesive. In this study, stress and distorted displacements on mirror surface were analyzed according to the different contact surface form accuracies and bolt clamping forces by using the finite element analysis method.

**Keywords:** Reflector, Form Accuracy, Bolt Clamping Force, FEA(Finite Element Analysis)

#### 1. 서 론

최근 들어 고정밀 광학계가 요구되는 항공우주, 군수, 계측, 영상 관련 산업이 비약적으로 발전하고 있으며 이로 인해 고정밀 반사경의 제작에 대한 필요성이 부각되고 있고 고정밀 반사경의 제작은 고부가가치 기술로서 매우 중요하게 인식되고 있다. 이러한 고정밀 반사경의 개발에는 초정밀 가공기술이 필요할 뿐만 아니라 정밀한 측정 및 조립 기술이 요구된다. 따라서 정밀 광학계의 측정 및 조립 기술에 대한 관심도 크게 증가하고 있는 실정이다.

고정밀 반사경의 제작, 측정 및 조립의 정밀도를 높이기 위해서는 반사경의 재질 및 가공과정에서의 변형 그리고 조립 및 측정과정에서 발생하는 변수들에 대한 해석적인 접근이 선행되어야 한다. 하지만 고정밀 반사경 재질의 특성에 따른 최적 가공 조건, 가공 방법, 측정 분야에 대한 연구에 비해 조립 과정과 마운트에서 발생할 수 있는 요인들에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다 [1-4].

일반적으로 모든 구조물들은 이상적인 수평면을 가지고 있지 않으며 이로 인해 조립되는 표면도 이상적인 평면 상태를 유지하기 어렵다. 또한

[접수일: 2013. 3. 15, 수정일: 2013. 4. 8, 게재확정일: 2013. 4. 10] \*한국기초과학지원연구원 첨단장비개발사업단, \*\*충남대학교 기계설계공학과, †Corresponding Author: Department of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, South Korea (E-mail: leeys@cnu.ac.kr)

고정밀 광학계의 조립 과정에서 온도, 습도와 같은 환경적인 요인과 마운트와 반사경의 조립에 사용되는 볼트의 체결력, 접촉제의 접착력도 조립된 시스템의 정밀도 저하를 유발할 수 있다. 이렇듯 반사경의 조립에 사용되는 볼트의 체결력과 접촉제의 접착력이 반사경면의 정밀도에 미치는 영향에 대한 연구들이 최근 들어 이루어지고 있는 실정이다[5-8].

본 논문은 광학계에 사용되는 고정밀 반사경이 고정되는 마운트 접촉면의 형상 정밀도와 볼트의 체결력에 따라 반사경면에 발생하는 응력과 변형량에 대해 유한요소법을 이용한 구조 해석을 수행하여 본 연구에서 적용한 반사경-마운트 조립체의 최적 볼트 체결력과 마운트의 형상 정밀도를 제시하였다.

## 2. 유한요소해석 모델

주어진 반사경의 형상 정밀도에 대해 볼트의 체결력에 따른 반사경면의 응력분포와 변형량을 해석하기 위해 고정밀 반사경 및 마운트에 대해 3차원 유한요소 모델을 적용하였으며 상업용 해석 소프트웨어인 Ansys(Workbench 14.0, ANSYS, Inc., U.S.A.)를 이용하였다. 유한요소 모델식에 적용한 반사경과 마운트의 재료는 반사광학계에서 주로 사용하는 알루미늄 합금(Al6061-T6)을 사용했으며[4] 볼트의 재료는 스테인레스 스틸(stainless steel 304)을 사용하였다. 반사경의 직경은 100 mm, 두께는 5 mm이고, 고정 마운트의 직경은 100 mm, 두께는 15 mm로 설정했다.

반사경과 마운트 사이의 접촉면은 완전 접촉상태가 아니며 따라서 제시한 3차원 유한요소 모델의 마운트 표면에서는 굴곡진 형상을 가정하였으며 반사경의 접촉표면은 완전 평면 상태를 가정하였다. 이때, 마운트의 형상 정밀도는 0.01 mm로 설정하였는데 이는 일반적인 범용 가공기의 형상 정밀도 수준과 동일한 것이다. 또한 적용한 3차원 유한요소 모델은 반사경과 마운트의 완전 접촉 부위에서 볼트가 체결된 모델과 반사경과 마운트가 접촉되어있지 않은 부위에서 볼트가 체결된 두 가지 모델을 설정하여 응력 및 변형량 해석을 수행하였다.

볼트의 체결력은 4~20 N까지 2 N 간격으로 총 9가지의 경우를 적용하였으며 이는 일반적으로

반사경과 마운트를 고정하는데 이용되는 볼트의 체결력이 10 N에서 이루어지고 있기 때문이다. 반사경과 마운트의 체결에 이용되는 볼트는 120도 간격으로 총 3지점에 적용한다. Table 1은 유한 요소 모델식에 적용한 변수들과 경계 조건을 보여주고 있다.

Fig. 1은 적용된 반사경의 경계조건이 명시된 3차원 유한요소 모델의 top view와 bottom view를 보여주고 있으며 이때 마운트의 밑면은 고정되어 있다.

Fig. 2(a)는 반사경과 마운트가 접촉되는 구간에서 볼트가 체결된 모델의 개략도이며 Fig. 2(b)는 반사경과 마운트가 접촉되어있지 않은 구간에서 볼트가 체결된 유한요소 모델의 개략도를 보여주고 있다.

Table 1 Boundary conditions used in the three dimensional model of reflector and mount

Parameters		Values
Diameter (mm)	Reflector	100
	Mount	100
Thickness (mm)	Reflector	5
	Mount	15
Material	Reflector	Al6061-T6 (Aluminum alloy)
	Mount	
	Bolt	Stainless steel 304
Form accuracy of contact surface (mm)		0.01
Bolt position		Three-point (120 °)
Bolt clamping force (N)		4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20

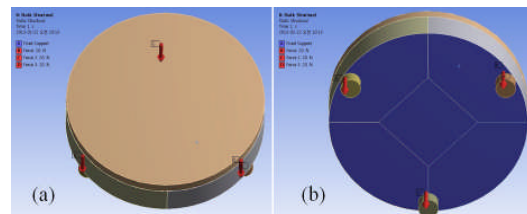


Fig. 1 Three-dimensional model of the reflector and mount; (a) top-view, (b) bottom-view

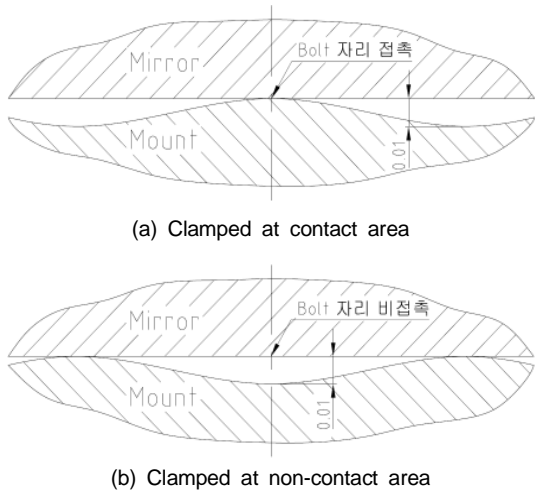


Fig. 2 Schematics of clamping conditions between reflector and mount (unit: mm)

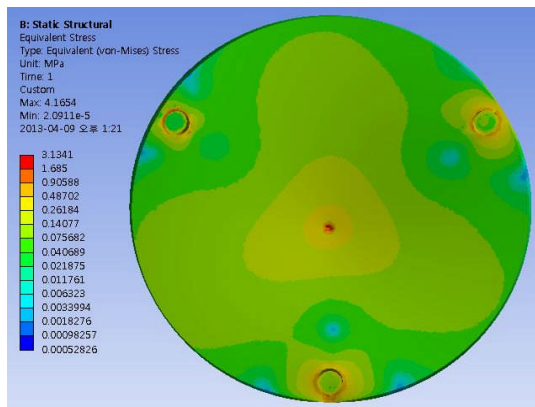


Fig. 3 Analyzed stress distribution at reflector which was clamped with mount at contact area; clamping force 20 N

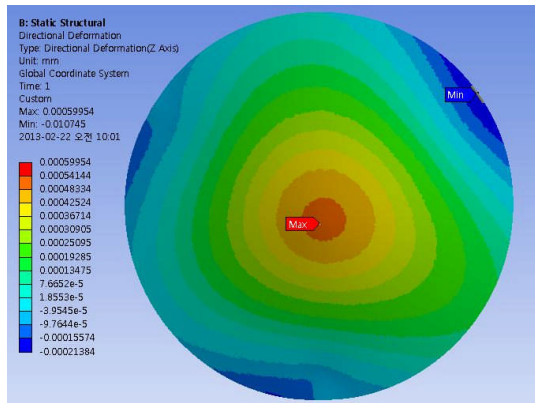


Fig. 4 Analyzed deformation distribution at reflector which was clamped with mount at contact area; clamping force 20 N

3. 실험 결과

Fig. 3과 4는 반사경과 마운트의 접촉부위에서 볼트가 체결되는 모델에 대해 반사경에 발생하는 응력과 변형량을 각각 보여주는 것으로서 볼트의 체결력이 20 N인 경우 반사경에 발생하는 응력이 3.134 MPa로서 가장 큰 값을 갖는 것으로 확인 되었으며 Fig. 4의 변형량 해석 결과에서도 역시 20 N의 볼트 체결력이 작용되었을 경우, 최대 변형량은 0.813  $\mu\text{m}$ 로서 가장 큰 변형량을 보여주는 것으로 확인되었다. Fig. 5은 적용된 9가지 종류의 볼트 체결력에 대해 반사경에 발생하는 최대 응력을 비교한 것으로서 해석에 적용한 볼트 체결력이 14 N 이상에서는 응력이 유사한 값을 보이는 것으로 평가되었다. 반면에 볼트 체결력에 따른 반사경의 변형량의 경우에는 Fig. 6에서 보여지는 바와 같이 체결력이 증가함에 따라 변형량도 점차적으로 증가하는 것으로 분석되었다.

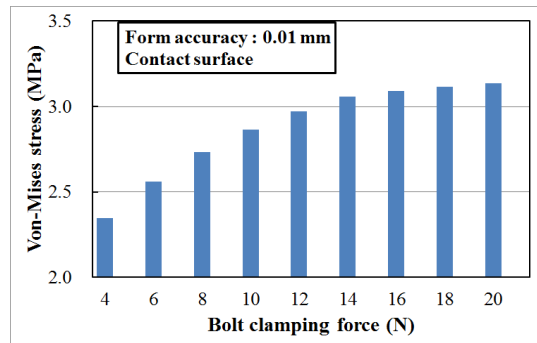


Fig. 5 Comparison of maximum stress of the reflector which was clamped with mount at contact area

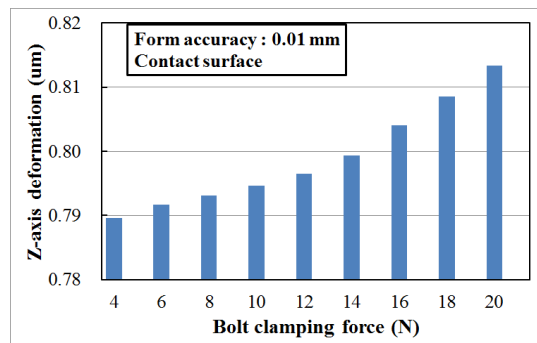


Fig. 6 Comparison of maximum displacements of the reflector which was clamped with mount at contact area

또한 반사경과 마운트가 접촉되지 않는 지점에서 볼트가 체결되는 유한요소 모델식에 대해 반사경에서 발생하는 응력과 변형량에 대한 구조 해석을 수행한 결과, Fig. 7에서 보여지는 바와 같이 볼트 체결력이 20 N인 경우에 반사경에서 발생하는 최대응력은 2.605 MPa로 가장 큰 값을 갖는 것으로 확인되었으며 반사경의 최대 변형량은 Fig. 8에서 보여지는 바와 같이 12 N부터 20 N까지는 최대 변형량이 10.45  $\mu$ m로 동일한 값을 갖는 것으로 평가되었다. Fig. 9는 반사경과 마운트가 접촉되지 않는 부위에서 볼트가 체결된 경우, 9가지의 볼트 체결력에 따른 최대응력을 비교한 결과로서 볼트 체결력이 증가함에 따라 반사경에 발생하는 응력은 동일하게 계속 증가되는 것으로 확인되었다. 반면에 비접촉 부위에서 볼

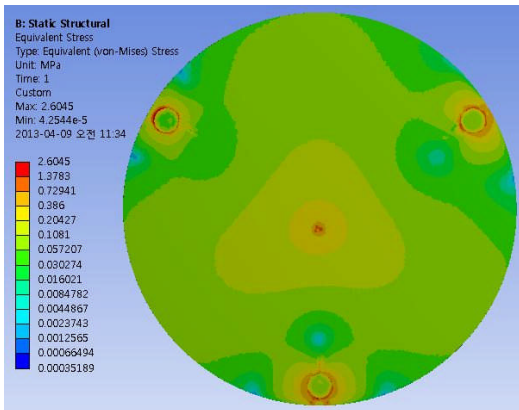


Fig. 7 Analyzed stress distribution at reflector which was clamped with mount at non-contact area; clamping force 20 N

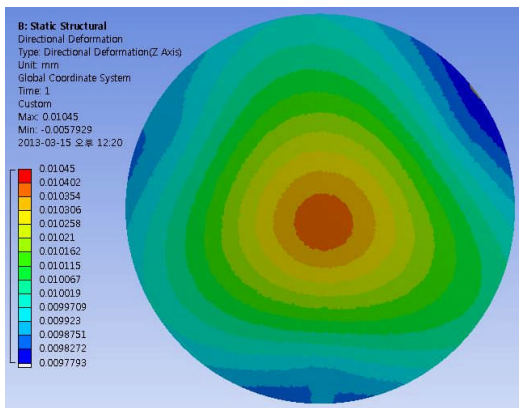


Fig. 8 Analyzed deformation distribution at reflector which was clamped with mount at non-contact area; clamping force 20 N

트가 체결되었을 경우에 반사경에 발생하는 변형량을 체결력에 따라 비교한 Fig. 10의 결과에서는 볼트 체결력이 12 N보다 크게 적용되는 경우들에 대해서는 해석된 최대 변형량도 일정하게 유지되는 것으로 분석되었다.

Table 2는 반사경과 마운트가 접촉되는 부위 및 접촉되지 않는 부위에서 각각 볼트를 체결하는 방식으로 제안된 3차원 유한요소 모델식들을 이용한 구조해석결과를 요약한 것으로서 반사경에 발생하는 응력이 최소인 경우는 반사경과 마운트가 접촉되지 않는 지점에서 볼트가 체결되는 경우로서 이때의 체결력은 4 N이며 반사경에 발생하는 응력은 2.133 MPa으로 확인되었다. 또한 반사경에 발생하는 변형량이 가장 작은 경우는 반사경과 마운트가 접촉되는 지점에서 볼트가 체결되는 경우로서 이때의 볼트 체결력은 4 N이고 최대 변형량은 790  $\mu$ m인 것으로 분석되었다. 반사경과 마운트가 접촉되지 않는 지점에서 볼트를

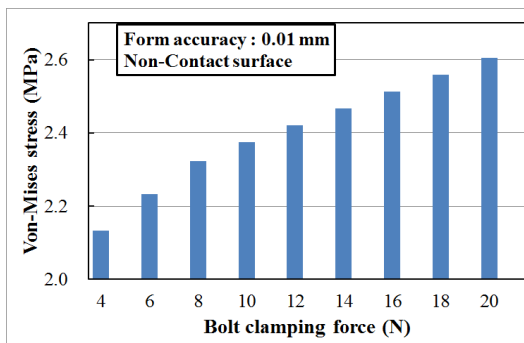


Fig. 9 Comparison of maximum stress of the reflector which was clamped with mount at non-contact area

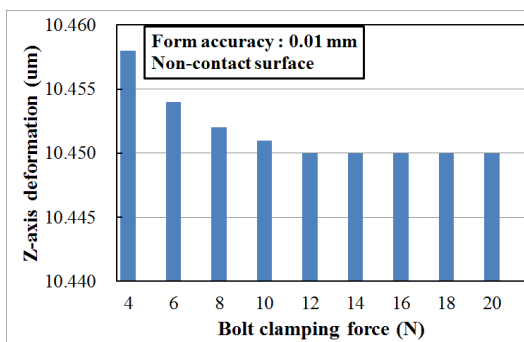


Fig. 10 Comparison of maximum displacements of the reflector which was clamped with mount at non-contact area

Table 2 Results of finite element analysis

Set clamping force (N)	Stress (MPa)		Deformation ( $\mu\text{m}$ )	
	contact	non-contact	contact	non-contact
4	2.346	2.133	0.790	10.458
6	2.562	2.233	0.792	10.454
8	2.732	2.323	0.793	10.452
10	2.862	2.375	0.795	10.451
12	2.972	2.421	0.797	10.45
14	3.056	2.467	0.799	10.45
16	3.091	2.513	0.804	10.45
18	3.117	2.559	0.809	10.45
20	3.134	2.605	0.813	10.45

체결하는 경우에 있어서 반사경에 발생하는 응력이 작은 값을 갖는 것으로 해석되는 이유는 볼트의 체결력이 접촉면에 바로 작용하지 않기 때문인 것으로 분석되며 반면에 반사경과 마운트가 접촉되는 지점에 볼트가 체결되는 경우에 반사경에 발생하는 응력이 큰 값을 갖는 것으로 해석되는 이유는 반사경의 볼트 체결 부위에 응력집중 현상이 발생되기 때문인 것으로 보여진다. 또한 반사경과 마운트가 접촉되지 않는 지점에서 볼트가 체결되는 경우에 반사경의 변형량이 크게 분석되는 이유는 비접촉으로 인한 영향이 크게 작용하는 것으로 평가되므로 반사경과 마운트를 체결하는 볼트는 두 부분이 비접촉되는 지점보다는 접촉되는 지점에서 체결되는 것이 반사경에서 발생하는 변형량을 최소화시킬 수 있는 것으로 확인되었다.

#### 4. 결론

본 논문은 광학계의 개발에 사용되는 고정밀 반사경에서 발생하는 응력과 변형량을 유한요소 모델을 이용하여 구조 해석한 것으로서 반사경이 고정되는 마운트가 임의의 형상 정밀도를 갖도록 모델을 설정하였고 접촉면과 비접촉면에 대해 다양한 볼트 체결력을 적용하여 반사경면에 응력 및 변형량이 어떻게 분포되는지를 분석하였다.

구조 해석 결과, 반사경과 마운트가 접촉되는 지점에서 볼트가 체결되고 마운트의 형상 정밀도를 0.01 mm로 가정한 경우에 있어서 790 nm의

최소 변형량을 갖는 것으로 분석되었으나 일반적으로 가시광 영역의 파장대에서 이용되는 반사경의 최대 변형량은 이보다 작은 수치인 것으로 알려져 있으며 따라서 고정밀 반사경면에서 발생할 수 있는 응력과 변형량을 개선하기 위해서는 본 연구에서 적용한 마운트의 형상 정밀도보다 더욱 정밀한 가공을 수행할 수 있는 초정밀 가공을 필요로 하며 향후 이러한 개선된 형상 정밀도를 적용한 마운트에 체결되는 반사경에 대한 응력 및 변형량에 대한 연구가 보강되어야 할 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

- [1] A. M. Hvisc and J. H. Burge, "Structure function analysis of mirror fabrication and support errors," *Optical Manufacturing and Testing VII, Proceeding the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers* 6671, pp. 1-10 (2007)
- [2] M. K. Cho, J. D. Vries and E. Hansen, "Performance evaluations of the ATST secondary mirror," *New Developments in Potomechanics, Proceeding the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers* 6665, pp. 1-13 (2007)
- [3] S. Y. Yu, H. S. Yi, J. H. Lee, H. S. Yim, Y. J. Choi, H. S. Yang, Y. W. Lee, H. K. Moon, Y. I. Byun and W. Y. Han, "Performance improvement of near earth space survey(NESS) wide-field telescope (NESS-2) optics," *Journal of Astronomy and Space Sciences*, Vol. 27, No. 2, pp. 153-160 (2010)
- [4] B. H. Kim, J. U. Lee, I. Moon, H. S. Yang, H. Y. Kihm and Y. W. Lee, "Optimization of 30 cm lightweight mirror," *Korean Journal of Optics and Photonics*, Vol. 21, No. 5, pp. 214-223 (2010)
- [5] S. C. Yang, G. H. Kim, H. S. Kim, S. Y. Lee, M. S. Kim and J. H. Won, "The technique of ultra precision machining of infrared optical-system for space," *Journal of Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 24, No. 2, pp. 19-24 (2005)

- 
- [6] S. C. Yang, G. H. Kim, H. S. Kim, H. S. Shin and J. H. Won, "A study on the characteristics on ultra precision machining of IR camera mirror," *Journal of Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 23, No. 5, pp. 44-50 (2006)
- [7] B. H. Kim, J. U. Lee, I. Moon, H. S. Yang, H. Y. Kim and Y. W. Lee, "Optimization of 30 cm lightweight mirror," *Korean Journal of Optics and Photonics*, Vol. 21, No. 5, pp. 214-223 (2010)
- [8] J. H. Burge, L. B. Kot, H. M. Martin, R. Zehnder and C. Zhao, "Design and analysis for interferometric measurements of the GMT primary mirror segments," *Optomechanical Technologies for Astronomy, Proceeding the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers* 6273, pp. 22-1-22-21 (2006)